

小形单相変圧器の温度上昇について (II)

岩原 正吉* 本堂 義記* 村木 浩* 宮沢永次郎*

On the Temperature Rise of the Small Size
and Single Phase Transformer (II)

Masayoshi IWAHARA*, Yoshinori HONDOU*,
Hiroshi MURAMOTO* and Eijirou MIYAZAWA*

(Received Jul. 31, 1979)

Temperature rise of the core-type and shell-type transformer has been studied with the node analysis.

Taking into account the geometrical symmetry of the transformer, it is cutted into many of portions, the thermal resistor networks approach is used and governing equations are solved by the numerical technique.

On the other hand, three kinds of coil frame have been experimented in trial transformers, and the effects of heat conductivity in these coil frames were investigated for the heat exchange between the core and coil of transformers.

Numerical results give good agreement with the experimental data of trial transformers.

1 ま え が き

電気および電子機器の設計では、色々な設計評価条件が考えられるが、特に一定期間の寿命と経済性が重要な評価条件として考慮される。前者は実用可能な絶縁物に関する技術に強く依存しており、後者は前者の技術を前提とした適切な主要材料の選択と運転条件に依存している。

特に絶縁技術の進歩によって機器の構造は著しく変化する。従って、要求される評価条件を最大または最小とする設計を行うには先づこの技術上の問題が解決されなければならない。この問題が解決されると、絶縁技術は用途によって任意選択可能な要件となり、次の問題はいかに効率良くこれらの技術を利用して機器を構成するかということとなる。

後者の問題において、特に重要なものは放熱問題であり、効果的な放熱が考慮されなければ良い設計はできない。

すなわち、機器内部で局部的に高い温度の点が存在すれば、機器絶縁はその事を考慮に入れて行わざるを得なくなり、全体的に見て効率の悪い絶縁処理となる。

効率の良い絶縁処理を行うには、機器内部の温度分布を正確に把握できることと、かつどのような温度分布とすることができかねるかを知らなければならない。

筆者らは上記の視点に立って、電子機器用変圧器を対象として、その温度分布を内外部にわたって解析することをこの数年来続けている。^{1), 2), 3)} 特に変圧器表面の温度分布については2次元的

* 電気工学科

に詳しく検討を加えた。¹⁾ その結果、変圧器表面はかなり一様な温度分布となっていることが明らかとなった。

しかし、内部の温度分布については未検討であったので、最高温度点の決定や絶縁材の熱定数との関連性を明らかにするために変圧器の放熱機構全体に注目し、解析を続けて来た。その結果、変圧器の熱伝達の機構がかなりの程度詳細に変圧器の内外部について明らかになった。

解析は厳密には伝導伝熱、対流伝熱、ふく射伝熱に関する方程式を解くことによらなければならないが、古くからその実用性が高く評価されている熱抵抗法^{4), 5), 6)}を用い、かつこの方法で得られる熱回路の解析に幾らかの工夫を試みた。

以下、解析の方法およびその結果と比較のために行った実験結果について報告する。

2 熱等価回路

先づ、解析の対象となる変圧器を熱抵抗回路として表現する。この時、得られる回路を以下では熱等価回路と呼ぶものとする。

解析の対象とした変圧器は、電子機器用電源変圧器で図1に示す寸法のカットコアを用いた内鉄形および外鉄形である。

それぞれの組立形状は図2に示す。

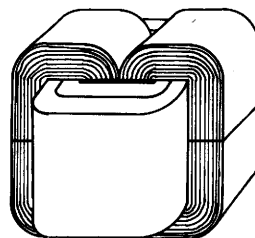
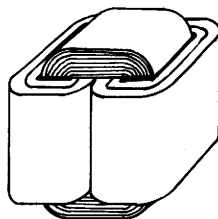
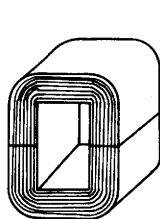


図1 鉄心の形状

a) 内鉄形

b) 外鉄形

図2 組立図

熱等価回路を作成するには変圧器の内外において、変圧器内部で発生した熱がどのように伝達されるかを知らなければならない。

伝熱工学⁴⁾によれば、任意の物体内外における熱の伝達は大別して i) 伝導伝熱, ii) 対流伝熱, iii) ふく射伝熱の3つの様式によって行われることは、先にも述べた通りである。然るに、対象とする物体を適当な数に分割し、その区分内の平均的温度のみに注目するものとするとその区分を通過する熱流および温度差との間に熱抵抗と呼ぶ係数を導入することによって、その区分を記述することができる。この定義によって決められる熱抵抗は伝熱の形態毎に図3のようになる。これらの熱抵抗は解析の区分を明らかにするとその値が定まる。

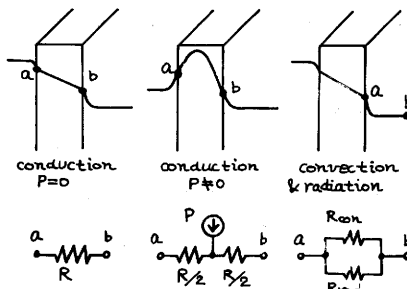


図3 伝熱の形態と熱抵抗の表示法

所で、この様にして得られる熱等価回路は熱源として定常熱流源のみを有することとなり、単位面積あたりの量を基準にした解析区分毎の熱係数で扱うと便利である。そこで、熱抵抗を定義するよりも熱コンダクタンスを定義する。

すなわち、対象となる区分に対して次の3種類の熱コンダクタンス G 、 G_r および G_c を定義する。この様に定義することの便利さは、次の節でより明確にされる。

$$G = gS \quad (W/^\circ C \cdot h); \quad g = \frac{\lambda}{d} \dots\dots\dots(1)$$

$$G_c = g_c S_c \quad (W/^\circ C \cdot h); \quad g_c = h_c \dots\dots\dots(2)$$

$$G_R = g_R S_R \text{ (W/}^\circ\text{C} \cdot \text{h)}; \quad g_R = h_R \text{(3)}$$

ここで、 G ：伝導に関する熱コンダクタンス、 G_C ：対流に関する熱コンダクタンス、 G_R ：ふく射に関する熱コンダクタンス、 S ：伝導に関する熱流通過方向の面積（ m^2 ）、 S_C ：対流に関する熱流通過方向の面積（ m^2 ）、 S_R ：ふく射に関する熱流通過方向の面積（ m^2 ）、 d ：伝導に関する熱流通過方向の厚み（ m ）、 λ ：対象となる物体の熱伝導率（ $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ）、 h_C ：対流に関する熱伝達係数（ $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ）、 h_R ：ふく射に関する熱伝達係数（ $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ）である。

上記の熱コンダクタンスの概念を用いて、内鉄形および外鉄形の熱等価回路を求める。等価回路を求めるにあたっては、可能な限り変圧器における対称性を利用して、等価回路を簡単化する。

すなわち、次の仮定を置く。

- i) 変圧器中に生ずる鉄損、または銅損は鉄心または巻線中に一様に分布するものとする。
- ii) 冷却の方法は乾式、自然空冷とする。
- iii) 負荷は一定とし、変圧器各部の温度は定常値に達しているものとする。
- iv) 脚部左右の温度分布は同一とする。
- v) 継鉄前後の温度分布は同一とする。
- vi) 巻線の縦方向の温度分布は厳密には巻線中央より幾分上側で最高温度となる分布を示すが、電子機器用の小形変圧器であることを考慮して上下対称であるとする。

以上の仮定により、対象とする内鉄形および外鉄形の解析は、全体の $1/8$ を考慮することとなり、更に各部の温度上昇を検討するために図4に示す区分に分割する。

この時、内鉄形および外鉄形の損失はそれぞれの区分の中で一点に集中させ、これらの損失が変圧器の表面に達するまでの可能な経路を予測すると、それぞれの熱等価回路が得られる。可能な熱流の経路と損失分布を与えて得られる熱等価回路は図5に示される。

図5において、各熱コンダクタンスの添字は、計算される区分名とその内部における熱流の方向を示している。また、分割された区分内における熱流の方向は図6の規則に従って定めるものとした。

回路中、接地側の近くの熱コンダクタンスには記号 $^\circ$ が付けてあるが、これはこれらの熱コンダクタンスがいずれも変圧器の表面に関するものであること

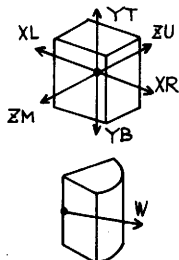


図6 熱流の方向に関する規則

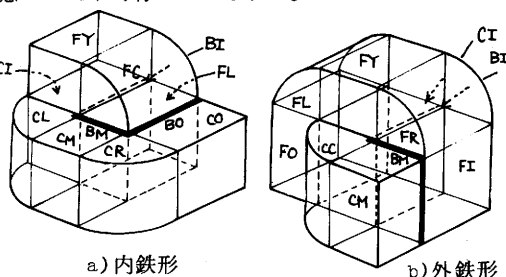
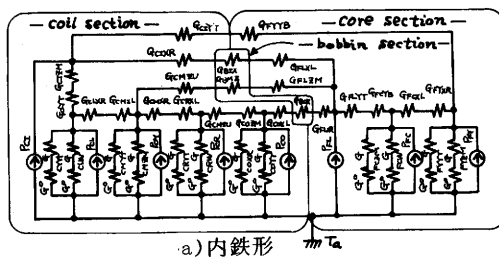
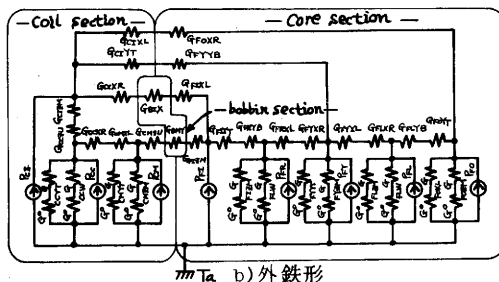


図4 変圧器の計算区域



a) 内鉄形



b) 外鉄形

図5 熱等価回路

を示し、(2)、(3)式で定義した G_c 、 G_r を用いて

$$G^{\circ} = G_c + G_r \text{ -----(4)}$$

と表わされる。

すなわち、 $^{\circ}$ 印のコンダクタンスは対流およびふく射に関する熱コンダクタンスの和となっている。

また、図中定熱流源記号で書かれている部分は、分割された区分内に発生する損失を表わしている。

各部の温度はこれらの等価回路を解くことによって求められるが、等価回路の形状からも幾つかの事を考察することができる。

すなわち、巻線と鉄心との間の熱移動経路がどのようなになっているか。また、内鉄形と外鉄形とはどのような相異があるかを検討することができる。

前者については、内鉄形、外鉄形のいかんにかかわらず、巻線と鉄心との間の熱の移動経路は4通りで、巻棒を通過して伝わるものと巻線と鉄心の間を直接伝わる経路とに2分されていることが分かる。内鉄形と外鉄形の相異は、巻線と鉄心との間の経路と主要な放熱面にある。巻線・鉄心間の経路では、内鉄形は巻棒を通じる経路が3通りと直接の経路が1通りであるのに対して、外鉄形は巻棒の経路が2通りと直接の経路が2通りとなっている。この事は、外鉄形よりも内鉄形のほうが巻棒の熱的特性に強く依存するものと考えられる。

また、主要な放熱面に関しては、内鉄形と外鉄形とは全く正反対の構造となっている。すなわち、内鉄形では主要な放熱面は巻線表面となっており、外鉄形では鉄心表面となっている。

更に、実際の動作条件を考慮すると、一般に、単位体積あたりの損失は鉄心の損失よりも巻線の損失のほうが大きく、動作条件にもよるが、およそ1:10~程度になることが多い。

この事と前記の考察を合せて考慮すると、内鉄形では巻線からの損失が鉄心側に十分移動し得たとしても鉄心表面が十分広くないために、鉄心側への移動が巻線の損失の放散には余り役に立たないと考えられる。それに対して、外鉄形では主要な放熱面が鉄心表面となっているので、巻線の損失を効果的に放散させるには巻線と鉄心との間の経路が重要な役割りを演ずる。その結果、巻棒の特性が全体の温度上昇に大きく影響するものと考えられる。

3 節点解析法^{7,8)}

前節の方法によって、対象とする変圧器の温度上昇を解析するための熱等価回路は、前記仮定によって図5となる。

従って、原理的には図5の等価回路を各枝の熱流について解けば、必要とする各部の温度上昇を求めることができる。しかしながら、図5 a)、b)には熱コンダクタンスとして47個また46個が、定熱流源として8個が存在する。仮りに、熱コンダクタンスが節点間において直列および並列となっている部分を予め1個にまとめて置いたとしても、なお熱コンダクタンスの数は16個となり、対象とする回路を解くに必要かつ十分な方程式を得ることは容易でない。

従って、回路中の素子数が多くても、効率良く、かつ一意的に回路を記述する手法が必要となる。この問題を効果的に解決する手段は、近年電気回路の分野で広く一般化して来ている節点解析法である。

本方法は素子と素子とが互に接続される接点に注目し、回路の方程式を立てるものであり、キルヒホッフの電流方程式を基準としている。そして、この方程式を作成するには基準節点を定めて、各節点に接続される素子との結合関係を示す節点接続行列を作成すれば、この接続行列を用いて自動的に回路の電流方程式が求められると言うものである。

所で、図5は熱コンダクタンスおよび定熱流源のみからなっているとすれば、これらの回路は単なる抵抗回路網と同じと見做することができる。

節点解析法では、抵抗回路網の解析は図7に示すような一般化された抵抗を定義し、この素子に対して電流方程式を作成する。

すなわち、抵抗のみからなる回路において、枝電流ベクトルを \tilde{I} 、枝に含まれる定電流源ベクトルを I_S 、枝電圧ベクトルを \tilde{V} 、枝に含まれる定電圧源ベクトルを E_S 、既約接続行列を A とおけば、対象とする回路は、

$$A \cdot \tilde{I} = 0 \quad \text{-----}(5)$$

$$\tilde{I} = I + I_S \quad \text{-----}(6)$$

$$\tilde{V} = V + E_S \quad \text{-----}(7)$$

$$I = G \cdot V \quad \text{-----}(8)$$

と表わされる。ただし、(5)式はキルヒホッフの電流方程式を与え、 V および I は抵抗の両端の電圧およびそれを通じて流れる電流のベクトルであり、(8)式は素子の性質を記述するオーム則であって、対角行列となっている。

(5)~(8)式により記述される回路は基準節点から測った各節点の電圧ベクトル V_n を導入すると、 \tilde{V} との間に

$$\tilde{V} = A^t \cdot V_n \quad \text{-----}(9)$$

が成立つ。ただし、 A^t は既約接続行列 A の転置行列である。

これより、先づ V_n が求められ、

$$V_n = (AGA^t)^{-1} \cdot (AGE_S - AI_S) \quad \text{-----}(10)$$

となる。

従って、(10)式を(9)式に、その結果を(7)式に、……と順次代入すれば、回路のすべての変数を決定することが出来る。この手法を熱抵抗回路網に適用する。

図5の回路中の素子を図7に対応させると、図8のように一般化された熱抵抗となる。また、電流には熱流が、電圧には各素子の温度差が対応する。

従って、対象とする熱等価回路において、周囲温度 T_a を基準点とし、この点より各節点までの温度差(温度上昇)ベクトルを ΔT_a とすれば、 ΔT_a は、

$$\Delta T_a = -(AGA^t)^{-1} \cdot A Q_S \quad \text{-----}(11)$$

と求められる。ここで、 G は対角要素のみからなる熱コンダクタンス行列、 Q_S は定熱流源、 A は既約接続行列である。

また、各枝の温度降下 $\Delta \tilde{T}$ は、

$$\Delta \tilde{T} = A^t \cdot \Delta T_a \quad \text{-----}(12)$$

と求められ、各枝の熱流 Q は $\Delta \tilde{T} = \Delta T$ となるので、

$$Q = G \cdot \Delta \tilde{T} \quad \text{-----}(13)$$

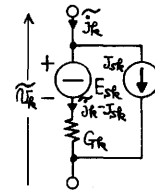


図7 一般化された抵抗

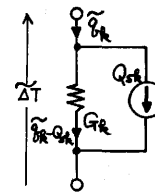


図8 熱等価回路における一般化された抵抗

と求められる。

上記のことより、熱等価回路の解析に節点解析法を導入すれば、既約接続行列 A を作成し、熱コンダクタンス行列 G を与え、行列演算の方法を考えることによって回路を解くことができる。その結果、問題は単純化され、節点数そのものが問題を複雑にすることを避けることができる。ただし、本解析法では節点数が増せば、結果を解析式で得ることは困難となる。

4 熱的係数の決定

次に、熱等価回路中の各熱コンダクタンスを決定するために、必要な熱に関する諸係数の算出方法について述べる。

図5における熱コンダクタンスは(1)~(3)式より明らかなように、分割された区分に関係した熱係数 λ 、 h_c 、 h_r および熱通過方向の厚みと断面積によって決定される。従って、分割された区分の形状寸法と熱係数の求め方を予め定めておく必要がある。

4・1 熱伝導率 λ

熱伝導率 λ は変圧器の使用材料・製造方法によって異なる。そのうち、鉄心は通常の製作過程では利用者の介入する余地がないので、図9に示す2方向のみを考慮し、巻線は毎層ごとに絶縁紙を挿入するとして同図に示すように3方向の熱伝導率を考慮する。その際必要なデータは実測値を利用することが望ましいが、伝熱工学に関する資料⁹⁾等を利用して決定することとした。

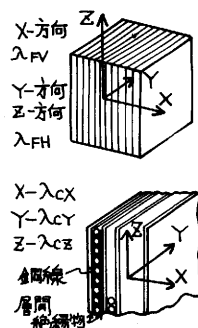


図9 鉄心と巻線中の熱伝導率

4・2 対流熱伝達係数 h_c

仮定によって、対象となる対流現象は空気の流れと自然対流とということになるが、この現象は今日もお、細部にわたって研究されている段階である。従って、これを考慮すると自然対流の熱伝達係数 h_c を厳密に決定することは困難である。

よって、ここでは伝熱工学上、その性質を十分良く説明し得る範囲内の理論⁹⁾を利用するものとする。

すなわち、求める平均的な対流熱伝達係数 h_c は、

$$h_c = \lambda_F \cdot \frac{Nu}{l} \quad (4)$$

と与えられている。ここで、 λ_F は空気の伝導率 ($W/m \cdot ^\circ C \cdot h$)、 l は代表長さ (m)、 Nu はヌセルト数と呼ばれる無次元数であり、

$$Nu = \left\{ \frac{2Pr}{5(1 + 2\sqrt{Pr} + 2Pr)} \right\}^{0.25} \cdot (GrPr)^{0.25} \quad (5)$$

と表わされる。

(5)式は更に2つの無次元数、すなわち、プラントル数 Pr 、およびグラスホッフ数 Gr によって表わされている。

この2つの無次元数は、

$$Pr = 0.71 \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g l^3 (T_s - T_a)}{\nu_F^2 T_F} \quad (7)$$

と表わされる。ここで、 g は重力の加速度 (m/S^2)、 ν_F は空気の動粘性係数 (m^2/S)、 T_S は物体表面の温度 ($^{\circ}C$)、 T_F は空気の薄膜の平均温度 ($^{\circ}C$)である。

(16式では P_r は定数となっているが、厳密には温度とともにゆるやかに変化する無次元数である。しかし、ここで対象とする温度範囲では、定数としても実用上問題はないものと思われる。

4・3 ふく射熱伝達係数 h_r

この場合の主要な法則は良く知られたステファン・ボルツマン則であり、これより求められたふく射熱伝達係数 h_r は、

$$h_r = 1.163 F \varepsilon \sigma (T_S + T_a + 546) \{ (T_S + 273)^2 + (T_a + 273)^2 \} \dots\dots\dots (18)$$

で与えられる。

ただし、 F はふく射面と相対する面の存在によって生ずる形態係数と呼ばれるものであり、 ε は物体表面のふく射率、 σ はステファン・ボルツマン定数である。

ここで、取扱う変圧器では相対向する面として、図10に示す3つの形状が存在する。

従って、それぞれの形状について(18式)における F を求めて置かなければならない。

この問題は今まで進めて来た計算の仮定を考慮し、図10中の点線のような等価的な形状について考察するものとする。

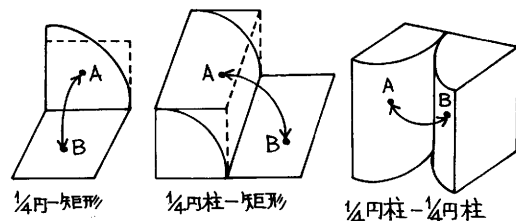


図10 変圧器における対向する面とその等価表面

この様に仮定することによって、各部の形態係数は既に良く知られている関係式より容易に求められる。

5 数値計算の手順

前節までに得られた結果を用いて数値計算を行う。計算は各枝の熱コンダクタンスおよび各部分の熱係数を与えれば、既に述べたように残りの手順は、行列演算を行うことである。

所で、第4節にて述べたように、対流およびふく射に関する熱伝達係数は対象とする表面の温度 T_S に依存することとなり、表面に関係する熱コンダクタンスは温度上昇 ($\Delta T_S = T_S - T_a$) に関して非線形となる。

しかし、回路が非線形であるとすれば、このままでは節点解析法は利用できない。従って、図5の回路の解を求めるには、若干の工夫が必要となる。

図5は所謂、非線形抵抗回路網となり、一般的に議論すれば、図の回路に安定な解が存在するかどうかを調べなければならない。しかし、ここでは実際の変圧器には必ず安定な温度分布が存在していることを考慮して、図5の回路には安定な解が存在しているものとする。

熱等価回路を求める際にも述べたが、対象とする物体を適当な数に分割し、その平均温度に注目し、等価回路を得た。この事は伝熱現象の今一つの強力な解析法である差分近似法と等価であることを意味している。然るに、差分近似法では適当な初期温度分布を与えて、次々と計算を繰返し、最終的な温度分布を求めている。

ここでも、この方法を採用する。とすれば、図5の回路は与えられる初期温度分布によって熱係

数が定数として定まるので、単なる線形回路となり、先の解析手順はそのまま利用できる。

これを図示すると図11の流れ図となる。この方法が収束する解を導くことは差分近似法との関係から見て、妥当なものと思われる。

6 試作変圧器と数値計算結果

始めに、この解析法がどの程度有効であるかを検討するために変圧器を試作し、数値計算の結果と比較する。

試作する変圧器の出力容量をどの程度にするかによって、変圧器内外の温度分布はかなり異なったものとなる。従って、出力容量によって温度分布がどのように変化するかを明らかにしなければならないが、ここでは引出し線やその他の周囲の物体に比較して十分大きな形状の変圧器で、かつ試作が比較的容易な容量を設定する。

すなわち、試作変圧器として出力容量 200 VA の内鉄形変圧器を考察する。また、巻枠の熱伝導率が全体の温度分布にどのように影響するかを検討するためにベーク板、絶縁紙および枠内に空気層がある絶縁紙の材料を巻枠とした場合の変圧器を検討することにする。試作した変圧器は図12に示す。図の左側から紙枠の組上り形状、ベーク枠を用いた巻線および空気層を含む紙枠を用いた巻線である。

試作された変圧器はできる限り周囲の空気流に乱れの少ない試験空間の中央に置き、無負荷運転、短絡運転および実負荷運転を行い、各部の温度が十分定常に達したと認められる時点でその時の温度を記録する。これらの温度は、試作器の表面に貼付けた熱電対を用いて連続的に測定した。

試作変圧器の実測値に対応する数値計算を行うにあたって、次の熱定数を用いた。 $\lambda_{FV} = 0.551$, $\lambda_{FH} = 31.5$, $\lambda_{CX} = 0.257$, $\lambda_{CY} = 0.397$, $\lambda_{CZ} = 350 \text{ (W/m} \cdot \text{°C} \cdot \text{h)}$ ⁹⁾。

また、巻枠材料の熱伝導率 λ_D はベーク材の場合は 0.232、紙枠の場合は 0.070、空気層を含む紙枠の場合は 0.023 (W/m・°C・h) とした。

この数値計算において、重要な点は分割された区分をどれだけ正確に記述するかと言った問題の他にどれだけ正確に使用材料の熱定数が与えられるかである。しかし、これらの値は変圧器製作上の含浸行程によって異なるため実測は困難であり、ここでは使用される材料の代表的な値を用いることとした。

このような考え方にもとずいて行った数値計算の結果と実測値を図13、図14および図15に示す。図13は無負荷で、図14は短絡状態で、図15は実負荷状態で変圧器を運転した場合である。

図において、計算値は実測値よりもいず

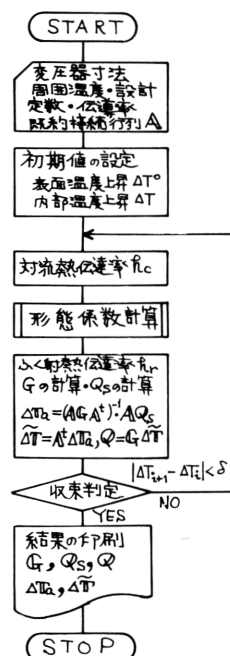


図11 数値計算の手順

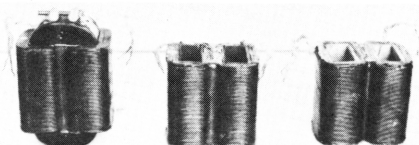


図12 試作変圧器と巻線

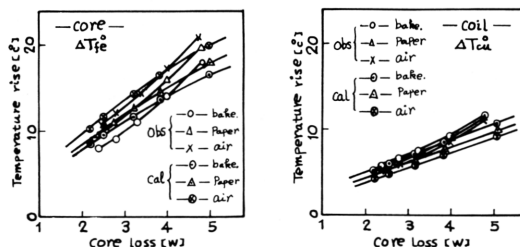


図13 無負荷時の温度上昇

れも少し高くなっているが、巻棒の熱伝導率の相異による温度上昇の違いは計算値と実測値とでは良く一致している。

これらの結果は物理的に次の様に説明される。先づ、計算値と実測値との相違は既に述べたように、各部の熱係数が実際の状態での値と異っていると思われることと、計算のために分割した区分数が少いために考えられる。

次に、巻棒の熱伝導率の相違の効果を考える。始めに、無負荷試験の状態では、主たる損失が鉄損であることを考慮すれば、この損失は鉄心表面および巻棒を通じ巻線表面に達し放散される。従って、巻棒の熱伝導率を良くすれば、鉄心表面の温度は低下し、巻線表面の温度は逆に上昇する。

また、短絡試験の結果については、主たる損失が銅損であることを考慮すれば、無負荷試験の場合とは逆に巻棒の熱伝導率が良くなれば、巻線の温度は低下し、鉄心表面の温度は低下するはずである。所が、数値計算の結果では顕著な差が出ているが、実測値では明確な差が出ていない。これは鉄心表面と巻線表面とを比べると巻線は鉄心よりも多くの垂直平面を有していることによると考えられる。一般に、対流熱伝達率 h_0 は物体の形状によって異なり、発熱する平面が垂直に置かれる場合と水平に置かれる場合とでは、垂直の場合の値が大きくなることが知られている。

また、表面の熱伝達係数は非線形であり、表面温度が高くなれば、その値も増大する。

そのため、無負荷の場合は巻線側に逃げた損失は巻線の大きな垂直面によって多量に放散されることとなり、短絡の場合は鉄心の垂直面がわずかであるために十分損失を逃し切れないと言うこととなる。このような放熱の仕組みは、実負荷の場合にもはっきりとみられる。

6・1 各部熱定数と温度上昇

上記のことをもう少しはっきりさせるために、熱定数を種々変更して各部の温度がどのように変化するかを調べてみた。再び、200V A程度の内鉄形変圧器を想定し、鉄心には日本工業規格C-6442の中のSC-210-Dの寸法のものを用いたとして、鉄心、巻棒および巻線の熱伝導率を種々に変化させて計算を行った。また、計算は実負荷状態を想定して行い、その結果は表1に示す。

表より、巻棒の熱伝導率が良くなると巻線側の表面温度は低下し、鉄心側の表面温度は上昇する。ただし、ある程度以上熱伝導率が良くなると、それ以上はどんなに良くしても全体の温度分布には殆んど影響しない。

次に鉄心についてみる。鉄心中の最も良く熱の伝わる水平方向の熱伝導率を良くすると鉄心の温度は上昇し、巻線の温度は低下していることが分かる。

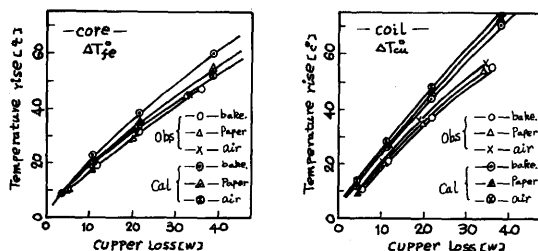


図14 短絡時の温度上昇

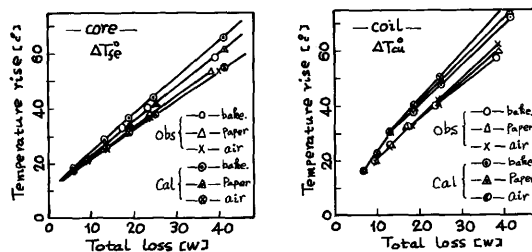


図15 実負荷時の温度上昇

表1 熱定数の変化と温度上昇

変化させる項目		ΔT_{cu} ($^{\circ}C$)	ΔT°_{cu} ($^{\circ}C$)		ΔT_{fe} ($^{\circ}C$)	ΔT°_{fe} ($^{\circ}C$)	
λ	($W/m^{\circ}C \cdot h$)		上	面 側 面		上	面 側 面
基 準	本文参照	41.5	20.1	32.5	38.9	29.8	37.8
λ_D	10^{-3}	42.6	20.6	33.4	37.2	28.6	36.2
	10^3	41.4	20.1	32.4	39.0	29.9	37.9
λ_{FH}	3.15	41.2	20.0	32.3	35.7*	24.8	29.1
	315	37.2	18.2	29.2	36.6	28.6	36.5
λ_{CY}	0.397×10^{-2}	42.7	0.68	33.4	39.6	30.2	38.4
	39.7	32.8	32.5	26.0	33.2	25.6	32.3

〔註〕 ΔT_{cu} : 巻線の内部温度上昇(平均) ΔT_{fe} : 鉄心の内部温度上昇(平均)

ΔT°_{cu} : 巻線の表面温度上昇(平均) ΔT°_{fe} : 鉄心の表面温度上昇(平均)

* : 部分的に高温の点を含む。

巻線についても同様な結果が得られる。ただし、巻線ではX軸方向とY軸方向とが熱定数の変更可能なものとして考えられるが、ここでは試しにY軸方向を変化させてみた。その結果、再び、熱伝導率を良くすると巻線の温度は上昇し、鉄心の温度は低下することが分かった。ただし、これまでと若干異なる点は巻線のX軸方向、すなわち、垂直面側の温度は上昇せずに下降していることである。この事は、鉄心表面と同様な考え方をすれば説明が付く。

7 あとがき

本文では節点解析法を用いて、小形の内鉄形変圧器の温度上昇がどのようになるかを検討した。その結果、使用材料の熱定数をどのように与えるべきかは問題として残されたが、使用材料の熱定数と温度分布の関係は十分説明可能であることが判明した。特に、巻線または鉄心の熱伝導率が悪くなるとそれぞれの表面温度が見かけ上低下することが明らかになった。この場合、当然のこととして内部の温度はかなりの程度高くなっている。従って、実際の変圧器において、温度上昇を調べる場合、相応の損失の発生が見込まれているにもかかわらず表面温度が低いとしたら、内部はかなり高温となっており、かつ絶縁処理に問題があったと考えて良い。

こうした現象はいずれも表面の非線形な熱伝達特性によっており、表面に達する損失が増せば表面の温度が上昇し、その結果、熱放散能力が更に増大し、より多くの損失を放散できると言う加速的な特性となっているためである。

このような熱放散の機構を理解しておれば、変圧器の熱設計を行う上で非常に有効であるのみならず、実際に製作された変圧器の内部の絶縁処理がどの程度の良好であるかを推定することができる。

以上、等価回路による解析を行ったことにより、小形変圧器における熱放散の仕組みがより詳細に明らかとなった。

しかし、外鉄形については十分な検討を行わなかったし、内部温度についても種々な場合をすべ

て検討したわけではない。これらの点については、分割数との関連性と加え合せて次の機会に詳しく報告したい。

また、熱係数を正確に与え、対流およびふく射による伝熱現象の記述方法がどの程度正確であるかも検討しなければならない。この点については、今後の検討事項としたい。

最後に、本研究を行うにあたっては実験および数値計算を行う上で卒業研究生桐林克己、青木荘八の両君に負う所が多い。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩原, 村本, 宮沢: 福井大工報, **24**, 2, 221-230, (1975)
- 2) 岩原, 村本, 宮沢: 電気学会 静止器・磁性材料合同研究会資料, TC-77-6/MAG-77-46, (1977)
- 3) 岩原, 本堂, 村本, 宮沢: 昭和52年電気4学会北陸支部連合大会, A-3, (1977)
- 4) J. P. Holman: Heat transfer, 3rd ed., McGraw-Hill, (1972)
- 5) A. K., Bratislava: Arch. Elektrotech., **49**, 2, 109-123, (1964)
- 6) W. Benecke: ETZ-A, **87**, 13, 455-459, (1966)
- 7) R. A. Rohrer, 斉藤正男, 篠崎寿夫共訳: 回路理論-状態変数解析入門, 学献社, (1973)
- 8) C. A. Desoer, E. S. Kuh: Basic Circuit Theory, McGraw-Hill, (1969)
- 9) たとえば, 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂第3版, (1977)

